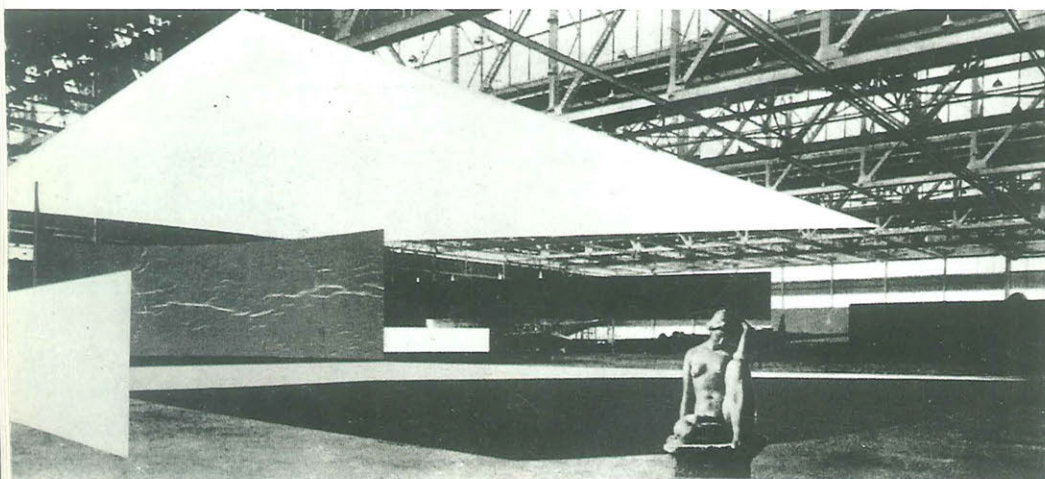


Construir en acero: forma y estructura en el espacio continuo

La irrupción del hierro en la edificación del siglo XIX supone para la arquitectura una convulsión sin precedentes. Acompañado del progresivo protagonismo del vidrio, este acontecimiento tecnológico abre camino a los dos planteamientos espaciales más emblemáticos de la construcción moderna: el rascacielos y el edificio diáfano. A la evolución del segundo dedica el siguiente texto Ramón Araujo, profesor de Construcción de la Escuela de Arquitectura de Madrid, en el que desarrolla un itinerario cronológico que abarca desde tipos históricos como la gran estación o el palacio de cristal, hasta las soluciones más características de nuestro siglo.



Mies van der Rohe utiliza una fotografía del interior del Assembly Building de los hangares Glenn Martin de Albert Kahn (1937) como fondo y envolvente para un proyecto de sala de conciertos.

El collage, de 1942, presenta una imagen sintética del espacio continuo del Movimiento Moderno y de la radicalidad de los planteamientos funcionalistas de la nave industrial.

Dos temas característicos de la arquitectura moderna son la construcción en altura (la forma caracterizada por la superposición de planos de uso) y la construcción de recintos diáfanos (la forma caracterizada por su techo).

Casi cualquier programa de arquitectura responde a uno de estos tipos de construcción o a una forma compuesta de ambos.

Si las soluciones en altura son la base de los programas residenciales y de trabajo, las de techo-cerramiento lo son de aquellas actividades colectivas que exigen un espacio diáfano y acondicionado.

Estos últimos programas dibujan casi una historia propia, a la que se ha estado en general menos atento que a la de la construcción en altura, debido tanto al fuerte papel que en estos edificios desempeña la estructura, como a su identificación con pro-

gramas especializados, tales como edificaciones industriales, deportivas, etc. Pero el progresivo éxito del espacio único para resolver muchos programas (como museos, aeropuertos, o incluso oficinas, que hoy son concebidos frecuentemente como 'contenedores') deja definitivamente fuera de lugar aquella separación.

Si nos proponemos aclarar algunos principios de acción para el diseño de aquellas formas capaces de resolver tan amplia variedad de programas colectivos, uno de los protagonistas de nuestra discusión será el acero: la idea de tales espacios continuos nace con él, y existe incluso una identificación entre el acero como material y los problemas de las grandes luces.

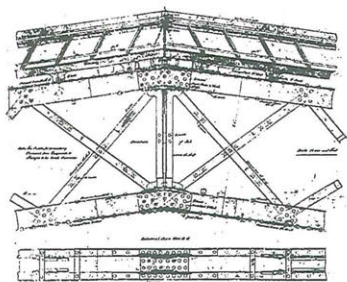
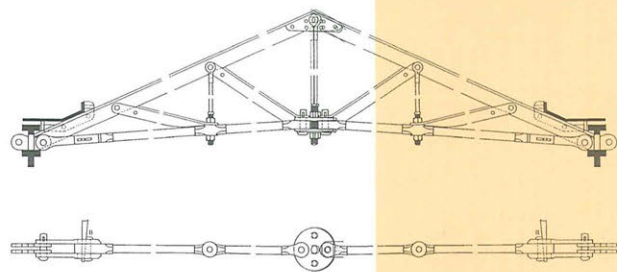
Vamos a ver cómo el diseño de estos espacios continuos dibuja una arquitectura profundamente determinada por la técnica constructiva y el diseño estructural: si trazamos un re-

sumen histórico de la evolución del recinto diáfano en acero, comprobaremos que los diferentes diseños giran siempre en torno a la evolución tecnológica del propio material y de sus técnicas y, sobre todo, a las invenciones de tipologías estructurales. De esta filosofía resultarán planes arquitectónicos de una geometría clara y estricta, ajena a los habituales problemas de estilo.

El corazón del problema será lograr la respuesta 'físicamente óptima' a una necesidad colectiva, y quizás por eso las diferentes propuestas para estos recintos se expliquen también necesariamente desde preocupaciones medioambientales. El diseño energético discurre en paralelo al estructural: la arquitectura está aquí protagonizada por su eficiencia.

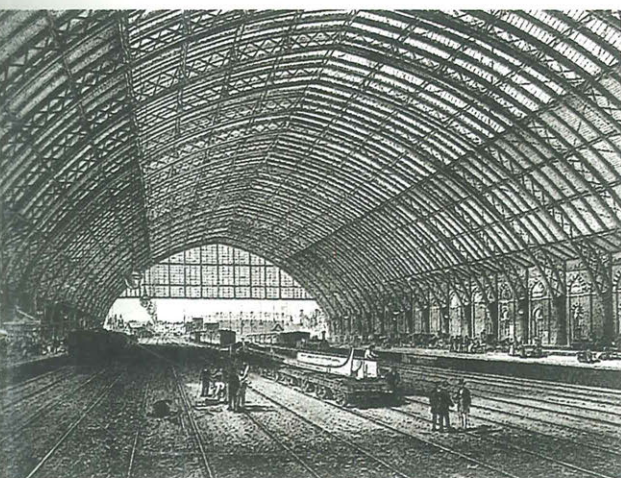
Vamos entonces a recordar algunos de los episodios fundamentales en esta historia del diseño del espacio diá-

Estación de Euston
(R. Stephenson,
1837). Planta y
alzado de las vigas
trianguladas de
hierro forjado y 12
metros de luz.

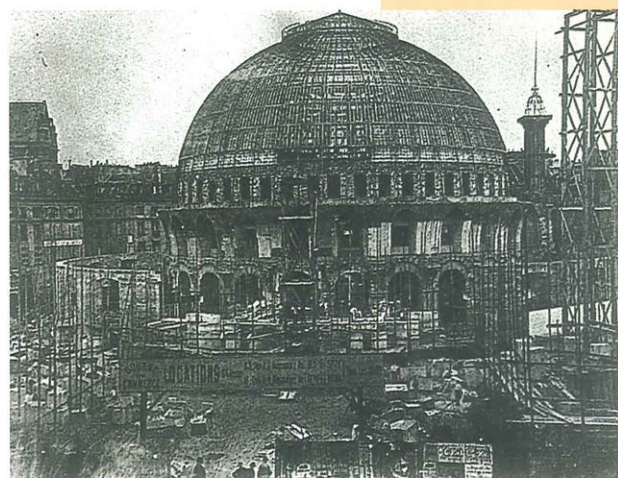


1. Los nuevos espacios del XIX: la arquitectura de hierro.

Invernaderos, estaciones y grandes ámbitos de exposición son los recintos ligados a la revolución técnica: el diseño de la estructura adquiere tal protagonismo que el tipo arquitectónico se confunde con el tipo estructural.



Estación de St. Pancras (W. H. Barlow, 1869). La luz, de 73 metros (1,8 metros de canto), es superada en la Galerie des Machines de la Exposición de París en 1889. Detalle de la clave y un grabado de la época



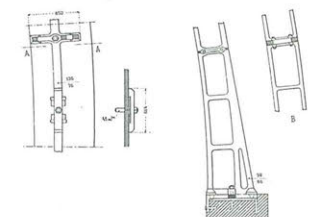
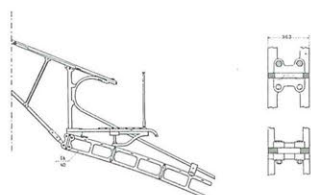
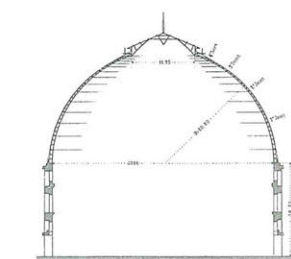
fano en acero, buscando en las soluciones técnicas los criterios para nuestros futuros diseños; porque esta historia está hoy en un punto candente, lejos todavía de alcanzar soluciones arquitectónicas satisfactorias.

Los nuevos espacios del XIX: la arquitectura de hierro

Invernaderos, estaciones, grandes recintos de exposición y reunión son los nuevos espacios que la revolución técnica requiere y que los sistemas tradicionales —la construcción mural— no pueden resolver: los nuevos tipos arquitectónicos serán de hierro, y el cambio de mentalidad que el nuevo material provoca es tal que las soluciones tradicionales y los arquitectos formados en ellas poco pueden hacer en la definición de estos nuevos tipos.

La arquitectura del hierro está inicialmente limitada por la fragilidad del hierro fundido, que, al requerir di-

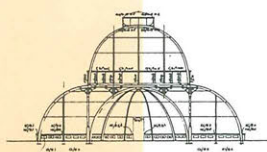
seños básicamente en compresión y uniones discontinuas, no puede aún alejarse definitivamente de los principios de la construcción masiva. Es la generalización del hierro forjado antes de mediados del siglo la que abre un campo de posibilidades realmente nuevas: el material es dúctil, resistente a tracción y flexión, apto para conformarse en sistemas de rodillos. Hacia 1830 están disponibles los primeros perfiles laminados y comienza a fabricarse la chapa corrugada; las uniones se resuelven por roblonado y atornillado principalmente; las piezas pueden curvarse, etc., lo que, unido a las posibilidades del hierro fundido, permite un importante arco de posibilidades en los elementos disponibles. Además, también a principios del siglo pasado comienza a producirse industrialmente el vidrio, que, con el nuevo proceso de 'cilindro a mano', puede ofrecer ya piezas grandes, curvas y asequibles.



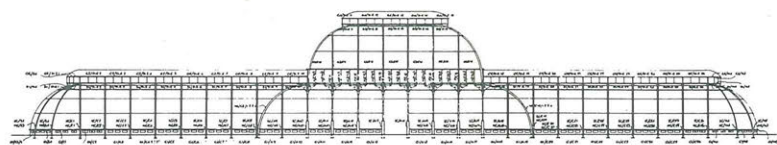
Cúpula del Halle au Blé, París (F. J. Bélanger y F. Brunet, 1809). Primer sistema de piezas-tipo formando un entramado de paralelos y meridianos atornillados: el hierro hace posible una luz de 39 metros sin necesidad de contrarrestos.

2. El palacio de cristal.

Basado en la experiencia del invernadero, el nuevo tipo se concibe como un completo mecanismo de piezas en el que todas ellas son diseños específicos y con el sistema de instalaciones perfectamente integrado en su forma.



Palm House of the Royal Botanic Gardens, Kew (D. Burton y R. Turner, 1848). Vistas exteriores de su estado actual y secciones. Quizás aún hoy no se haya superado una expresión tan poderosa de transparencia y ligereza.



Esta disponibilidad tecnológica coincide con los nuevos resultados prácticos de la 'explosión científica' del siglo XVIII; de hecho, gran parte de nuestros conocimientos básicos sobre resistencia de materiales, incluyendo el análisis de la flexión o la teoría de la elasticidad, se presentan y discuten en esos años.

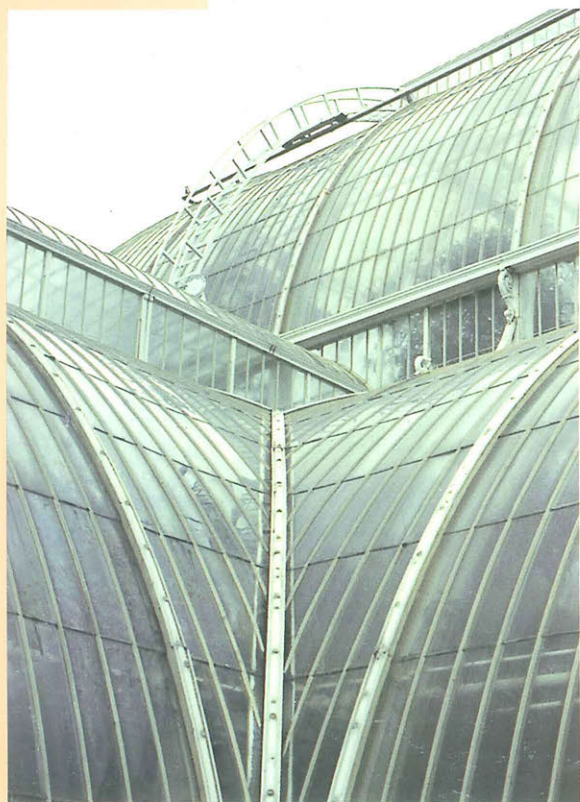
Ante este panorama, y frente a las nuevas construcciones requeridas por la sociedad, poco puede aprenderse de la tradición. Realmente se inicia una experiencia completamente nueva, algunas de cuyas consecuencias serán fundamentales para la arquitectura que nos ocupa: el diseño estructural adquiere un protagonismo absoluto, y el tipo arquitectónico se confunde prácticamente con el tipo estructural. Además, el diseño de las piezas está dictado por su forma de trabajo y las posibilidades tecnológicas del nuevo material, de modo que la evolución de la arquitectura se dirige principalmente a inventar nuevos tipos arquitectónicos eficientes, íntegros y económicos.

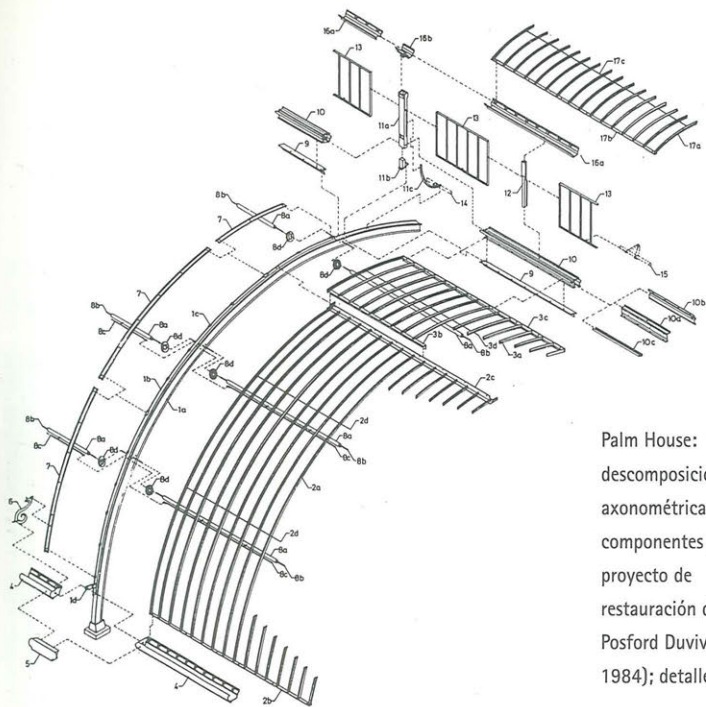
La nave lineal, que aloja la estación de ferrocarril y algunos programas expositivos, es uno de estos tipos, y en su evolución se reconoce claramente esta dirección hacia soluciones más eficientes, guiada por la aparición de nuevos elementos estructurales: sólo en las estaciones de Londres recorremos la evolución del sistema porticado, desde los cuchillos triangulados de 12 m de luz de Euston (1837), según

la solución de Polonceau a base de tirantes de hierro laminado y barras comprimidas de fundición, a un arco triangulado de 70 m atirantado por la plataforma de las vías (St. Pancras, 1876). Lo que se persigue es la estructura óptima a través del diseño de la directriz, de la solución a los empujes, del diseño de las piezas trianguladas para lograr una sección variable acorde a la distribución de esfuerzos, del diseño de los acuerdos para evitar concentraciones de tensiones y lograr un montaje sencillo y eficiente... un proceso que nos recuerda al perfeccionamiento de la catedral gótica. Todavía en el primer tercio del siglo XX, los sistemas de arcos y vigas trianguladas no tienen rivales y son la única respuesta viable a los problemas de luces importantes.

Otra tipología estructural característica de estos años es la cúpula, sin duda una de las protagonistas de la ciudad del XIX; aunque su recuperación pueda relacionarse con el gusto de la época (de hecho, son muchas las cúpulas metálicas que forman parte de edificios clasicistas, como el Capitolio de Washington de 1855), el interés de los constructores por ella tiene más que ver con las potencialidades de las formas de revolución para lograr una estructura óptima.

La cúpula de meridianos y paralelos, que permite por primera vez en la historia resolver grandes luces sin necesidad de masivos sistemas de contrarresto, es una solución obligada pa-





Palm House:
descomposición
axonométrica de sus
componentes (del
proyecto de
restauración de
Posford Duvivier,
1984); detalle de la



linternas y aspecto del
interior durante los
trabajos de
reconstrucción, con
los elementos
anulares de
postensado que atan
los arcos principales.

ra muchos programas funcionales. Desde la Bolsa de Comercio de París de 1811, el procedimiento evoluciona hacia los sistemas triangulados estables, con nudos articulados. Los ingenieros del XIX descubren así la superficie entramada, pasando del antiguo concepto de construcción organizada por elementos independientes, superpuestos y apenas colaborantes, a una estructura espacial, a un cascarón de elementos interconectados.

La mayor parte de esta arquitectura de naves y cúpulas está 'apeada' sobre viejos edificios de muros de carga, formando los techos de las galerías comerciales, los salones de las asambleas o los cruceros de las iglesias; en las estaciones, un conjunto clasicista les hurta el perímetro. Todo esto ha facilitado que aquellas realizaciones se hayan visto durante años más como soluciones estructurales de cubierta que como nuevas invenciones arquitectónicas. Sin embargo, lo son: las nuevas tipologías cupulares y basilicales recorrerán la historia hasta hoy como soluciones de plena actualidad, y la preeminencia del diseño estructural en la forma, del diseño de acuerdo a los esfuerzos, o la eficiencia física de la respuesta como objetivo, serán principios de la arquitectura de los que difícilmente podremos escapar.

El palacio de cristal

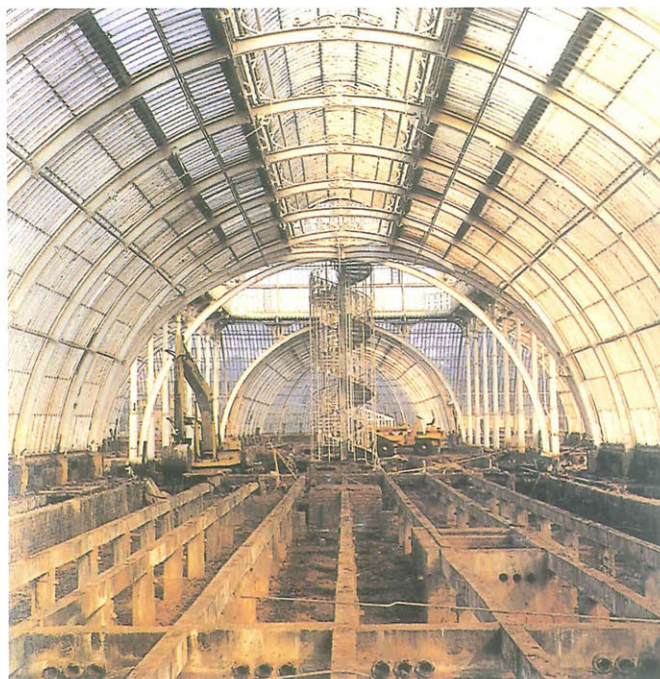
Algunas ocasiones singulares, sobre todo las exposiciones universales, permiten plantear una solución a los

nuevos recintos sin las limitaciones a que nos hemos referido: el palacio de cristal será el gran legado del XIX a la arquitectura del espacio diáfano.

Ya desde finales del XVIII se comienza a construir invernaderos y *orangeries* de pequeño tamaño, generalmente sobre el modelo de pequeños pabellones diáfanos de planta rectangular y techo apuntado, donde el hierro sigue las pautas de la fábrica y la madera. Pero todo cambia con las propuestas que desde 1815 hiciera Mackenzie para la cúpula acristalada.

Hierro y vidrio permiten construir un recinto donde todo son descubrimientos y en donde se siente un espíritu nuevo: con ellos se crea una superficie laminar, un cascarón en el que los elementos trabajan en forma solidaria, hasta tal punto que sus constructores son conscientes de que las escamas de vidrio triangulan el bastidor metálico, estabilizándolo. La estructura es ahora mínima y la transparencia máxima, con lo que se consigue que la forma sea la idónea para los objetivos del nuevo recinto (el invernadero en este caso), lográndose las máximas ganancias térmicas por insolación con las mínimas pérdidas superficiales.

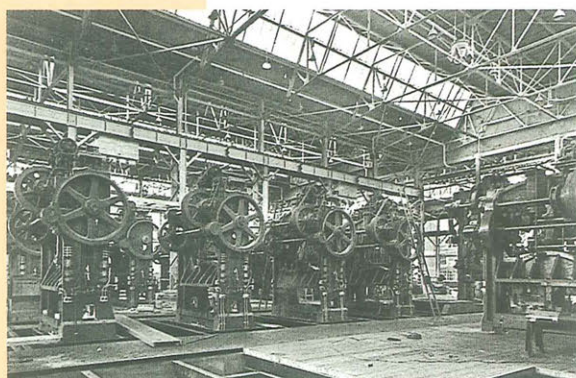
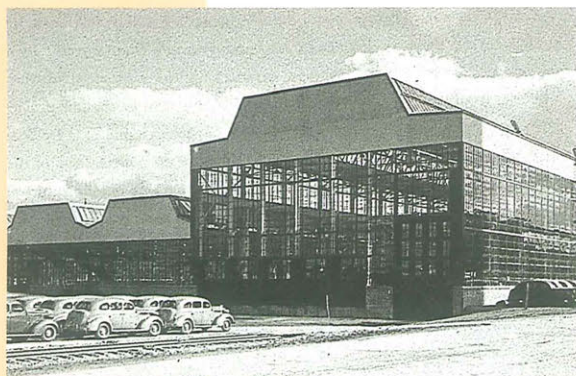
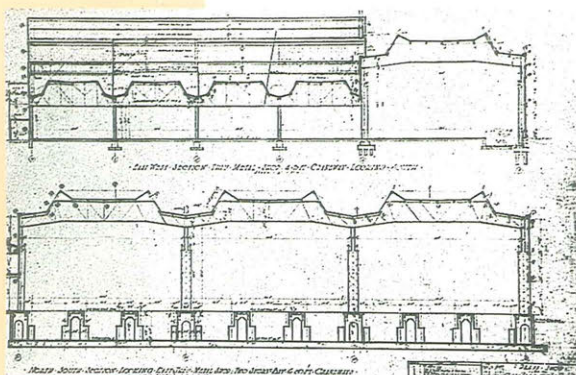
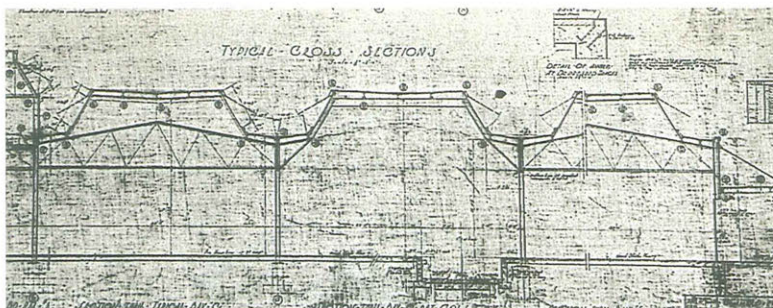
El edificio nace además con un sistema de instalaciones absolutamente integrado en la forma, ya que al comportamiento energético descrito se añade una calefacción de agua caliente bajo el suelo (otra nueva invención), con aperturas de ventilación



3. Naves industriales: América.

Tomando como punto de partida los espacios porticados y lineales del XIX, los elementos de directriz curva y las superficies entramadas se abandonan en favor de las vigas trianguladas de cordones rectos, a base de perfiles laminados.

Chevrolet Commercial Body Plant en Indianápolis (A. Kahn, 1935). Sección de las naves y vista del interior. Kahn se mantuvo rigurosamente fiel a la búsqueda de un espacio industrial eficiente y económico: criterios estrictamente técnicos bastaron para lograr un espacio de gran funcionalidad y belleza.



De Soto Press Shop en Detroit (A. Kahn, 1936).

perimetrales en el arranque de la cúpula y en su cenit. De este modo se logra un flujo laminar ascendente de aire caliente sobre el acristalamiento, que evita además las condensaciones sobre el cascarón.

Aparecen nuevas ideas, como el plegado de la superficie formando caballetes para incrementar las ganancias solares y facilitar el drenaje (Paxton); el uso de las columnas como bajantes; los cerramientos de dos hojas de vidrio, o la incorporación de canales para el desagüe de las condensaciones en las propias secciones laminadas.

La Palm House de Kew reúne todo este proceso de una forma genial, y parece sintetizar los logros y aspiraciones de la nueva arquitectura. Su plan es una nave longitudinal en cañón rematada por cúpulas esféricas, formando un cascarón de perfiles laminados de mínimas secciones. El encañonamiento de bóvedas y cúpulas contrarrestadas se estabiliza con unos cables postensados que zunchan anularmente la construcción, además de contar con el acristalamiento como triangulación del conjunto. Es una forma de captación solar, de drenaje eficiente y de mínimas pérdidas térmicas, en la que los sistemas mecánicos se integran espléndidamente según el sistema de linternas (*clerestories*) y aperturas antes descrito.

Se ha encontrado la forma óptima para el nuevo material, de la que nace un nuevo tipo arquitectónico cuyo alcance va mucho más allá del uso co-

mo invernadero: el Palacio de Cristal de Paxton crea sobre la experiencia del invernadero el nuevo palacio de exposiciones, y lo hace con unas dimensiones colosales.

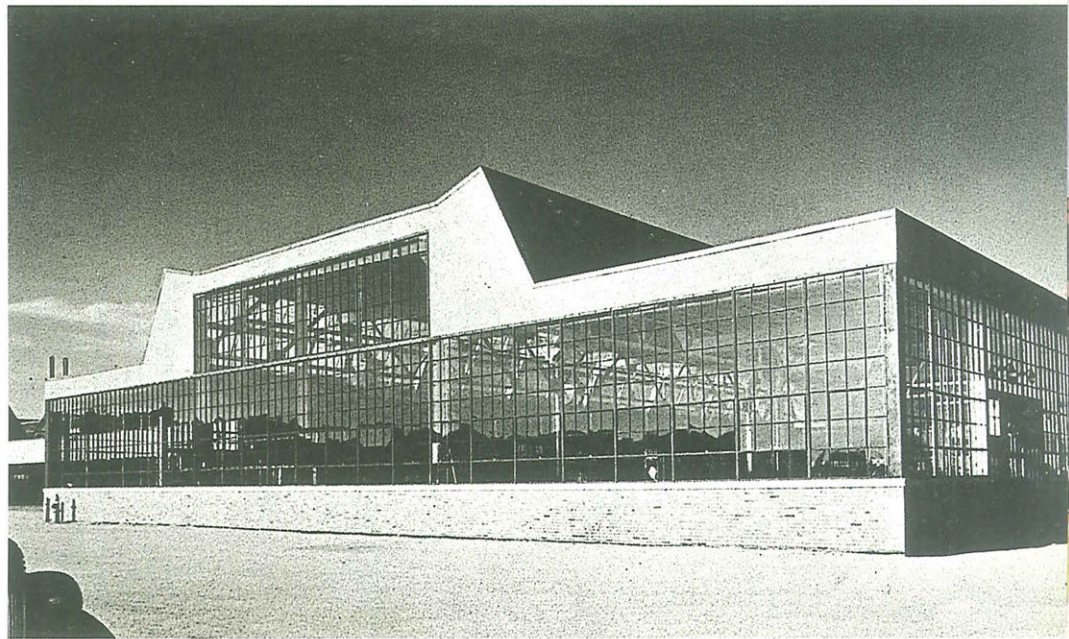
En primer lugar, el espacio se cierra con un material que hasta entonces sólo había desempeñado funciones secundarias, como el vidrio; además, dada su particular naturaleza (un material frágil y selectivamente transparente a las radiaciones solares), estos espacios acristalados constituyen algo absolutamente nuevo tanto desde su experiencia espacial como desde su comportamiento físico.

Por otro lado, el Palacio de Cristal es un edificio prefabricado, un impecable mecano de piezas —característica heredada del invernadero— que desde sus comienzos se ofreció al público como un producto de serie en el que todas sus piezas eran diseños específicos: el edificio de acero nació con el espíritu del automóvil.

Naves industriales: América

Hasta los años treinta de nuestro siglo los grandes recintos se siguen construyendo con los sistemas y soluciones tipológicas ya conocidos en el siglo pasado, sin que el paso del hierro forjado al acero haya supuesto cambios fundamentales. Además, también en los programas se manifiesta la misma continuidad: estaciones y mercados repiten las soluciones de pórticos y vigas trianguladas, y los edificios eclécticos siguen integrando

Chrysler Half-Ton
Truck Plant en Detroit
(A. Kahn, 1937). Esta
original estructura es
el punto de partida
de una nueva
arquitectura
industrial muy poco
conocida y valorada.



estructuras metálicas cupulares, como en el siglo anterior.

La construcción industrial es una excepción a todo esto: el inicio del siglo coincide con el despegue industrial que, caracterizado por la cadena de montaje y la electrificación, requiere edificios diáfanos, uniformemente iluminados y ventilados, con los nuevos sistemas de instalaciones integrados, además de baratos y rápidos de construir.

La atención se desplaza aquí a lograr diseños utilitarios y repetitivos; los sistemas porticados de las naves lineales del XIX se toman como punto de partida, y entre ellos, los más elementales: los perfiles laminados son el nuevo producto industrial y una filosofía estrictamente repetitiva recurre a ellos sin requerir mayor elaboración. Los elementos de directriz curva y las superficies entramadas se abandonan en favor de las vigas trianguladas de cordones rectos, que son pronto un producto prefabricado e integrado en los manuales de diseño.

Al mismo tiempo, se desarrollan las nuevas patentes de cerramientos ligeros (chapas metálicas, materiales aislantes, placas de cemento, tableros de yeso y de materiales cerámicos, etc.), configurando un sistema constructivo que satisface plenamente las nuevas demandas.

Aparte de algunas realizaciones singulares (el edificio para la AEG de Behrens o el Werkbund de Gropius, cuyas soluciones son muy próximas a

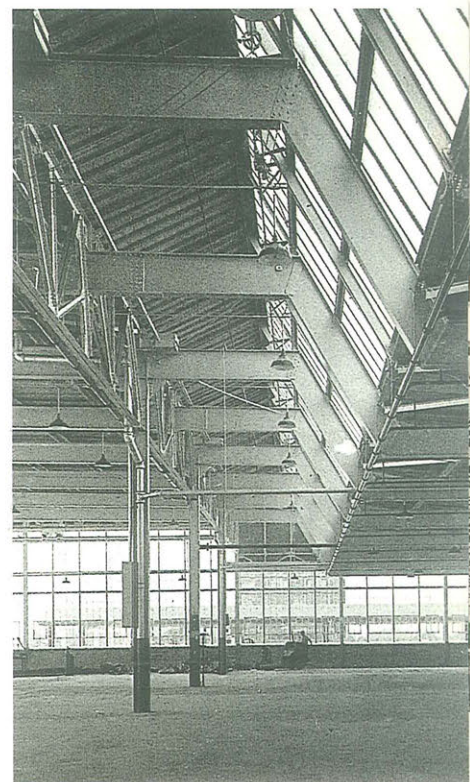
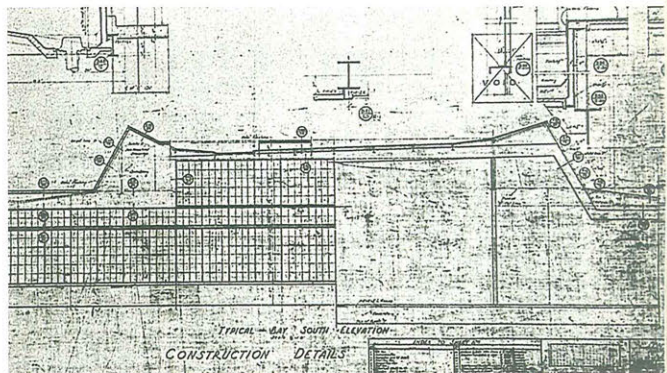
los modelos del XIX), las soluciones centroeuropeas son más convencionales y menos exigentes; es en los Estados Unidos donde se desarrolla una nueva tipología de nave industrial, que tendrá un gran alcance.

Se considera generalmente a Albert Kahn como el creador de la arquitectura industrial americana: a partir de la primera nave para Ford (que es todavía un edificio de varias plantas de hormigón armado, en el que se construirá el Ford T), opta por la nave diáfana de armazón metálico, que repetirá sobre los mismos principios para la nueva industria automovilística a través de innumerables realizaciones.

La nueva nave industrial es una actualización de los tipos de cerchas apuntadas del XIX con las nuevas técnicas metálicas, formando pórticos rígidos con celosías trianguladas —ahora del tipo Warren y Pratt— en unos órdenes de luces que se mantendrán como una constante (12 m y su doble en los tramos con puente grúa), arriostrados por triangulación en fachadas y cubiertas.

El sistema se completa con las nuevas carpinterías de acero laminado y cerramientos ligeros a base de chapas perfiladas, tableros de yeso, aislamientos minerales, etc. El espacio se acondiciona con las nuevas técnicas de iluminación, calefacción, etc., que se suspenderán de la estructura de cubierta.

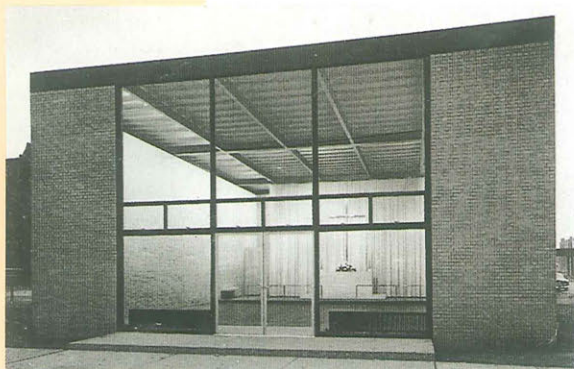
Además, la nave va a ser un espacio transparente. Por un lado, las paredes se van transformando en superficies



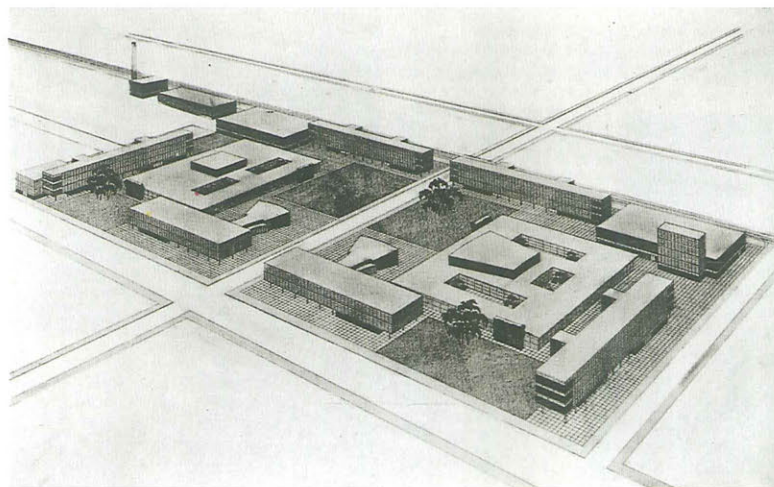
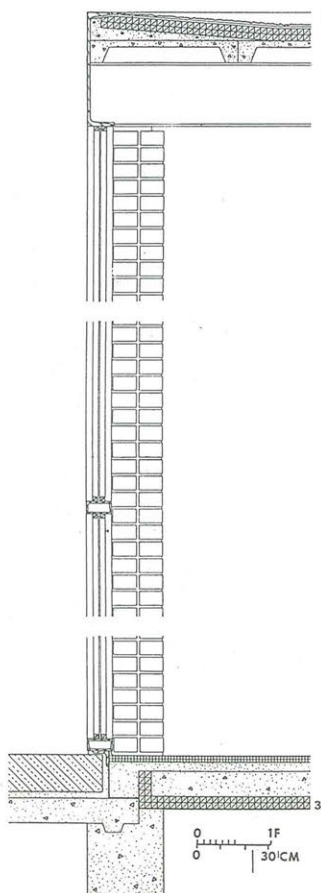
En la Chrysler Half-Ton Truck Plant una serie de perfiles de alma llena forman sistemas de voladizos compensados, en lugar de vigas trianguladas.

4. El Movimiento Moderno.

El gran recinto diáfano no es para la primera modernidad un campo prioritario de investigación: el principio de pórticos paralelos con vigas transversales de atado y geometrías regulares sigue vigente incluso al aumentar la luz estructural.



Illinois Institute of Technology en Chicago (L. Mies van der Rohe, 1938-1958): vista aérea de la primera versión del proyecto, fachada y sección vertical de la capilla.



acristaladas, con unas dimensiones sobrecogedoras. Los lucernarios son, desde el comienzo, grandes fajas longitudinales superpuestas a las vigas trianguladas, y es notable cómo, en las sucesivas obras, la triangulación de las piezas se va corrigiendo para adoptar perfiles aptos tanto para actuar como vigas como para integrar los lucernarios. Al mismo tiempo, los diseños ganan en ligereza y transparencia, dando lugar a un espacio diáfano y luminoso y a unas expresivas formas dictadas al tiempo por el óptimo funcionamiento estructural y ambiental.

En la Chrysler Half-Ton Truck Plant de 1937, una de las más hermosas obras industriales del siglo, las vigas trianguladas se sustituyen por perfiles de alma llena, formando un sistema de voladizos compensados, según los mismos principios de las experiencias previas.

La nueva fórmula es atractiva, eficiente y práctica, capaz de resolver de forma inmediata la reconversión industrial. Como en el invernadero, la solución y su espíritu rebasan los límites de los programas industriales: es seguramente una de las primeras grandes soluciones del acero para el espacio continuo y parece una legítima heredera de la ingeniería del XIX.

El Movimiento Moderno

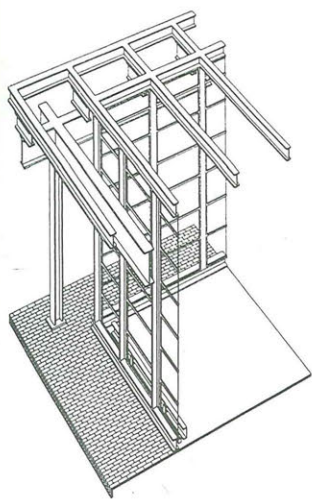
Aunque resulte extraño, en los años de formación de la arquitectura moderna pocos de sus protagonistas prestan atención al problema del

gran recinto. El lenguaje del Movimiento Moderno se va estableciendo alrededor de la vivienda y la construcción en altura, que es, además, la protagonista de la nueva idea de la ciudad; así, la construcción metálica se dirige hacia los sistemas porticados de bandejas, de los que hablaremos en otra ocasión. Por otro lado los primeros grandes recintos se resuelven en hormigón armado, que está en un momento pujante.

Los logros del XIX, y especialmente el Palacio de Cristal de Paxton, quedan como referencias revolucionarias, pero nadie descubre su potencial como origen de los nuevos tipos.

El pabellón de Barcelona de 1929 es la primera propuesta general de un espacio continuo de techo plano y perímetro acristalado que se vuelve a proponer de forma mucho más categórica como solución a todo el campus del IIT en 1939: Mies van der Rohe toma una planta de esqueleto metálico en altura y lo coloca en el suelo; será tan grande como sea necesario y no hará concesión alguna al hecho de tener el cielo sobre el forjado superior.

IIT parece explorar todas las variantes del nuevo tipo, con diferentes rangos de luces, programas, etc., pero siempre alrededor de unos principios de organización y procedimientos técnicos comunes: la estructura es un sistema de pórticos paralelos con vigas transversales de atado, que forman sistemas rígidos en busca siempre de geometrías de una gran regularidad,



tanto en la organización del entramado como en los acuerdos entre piezas.

Este sistema de barras protagoniza y ordena el espacio, y los cerramientos, opacos o acristalados, rellenan los recuadros entre ellas. Las carpinterías y remates, también de perfiles laminados, se superponen a la estructura formando un sistema de molduras que dan al orden estructural un nuevo protagonismo plástico.

Los elementos del sistema son, ante todo, un catálogo comercial de perfiles laminados (mucho más extenso en América que en Europa, con diferentes módulos resistentes y anchos de ala para el mismo canto): las uniones soldadas, ya muy evolucionadas, con preparación de bordes, encuentros en ojal oculto y sistemas de rigidizadores logran esos limpios acuerdos tan poco habituales hasta entonces. Los forjados son mixtos, de chapa perfilada y hormigón o placas prefabricadas de hormigón.

El elemento fundamental del cerramiento es la cubierta plana de asfalto y lana de roca, cuya flexibilidad e independencia del soporte permite resolver grandes superficies, además de los primeros muros cortina, de vidrios simples y perfilaría metálica, los cerramientos de doble hoja con tableros ligeros, etc.

Mies van der Rohe presta muy poca atención al diseño ambiental desde nuestro punto de vista actual, ya que en ese momento el problema principal es integrar en el nuevo edi-

ficio los recién nacidos sistemas de instalaciones, y la forma, en poco o nada responde a conceptos energéticos. En todo caso, la solución consiste entonces en integrar las redes de conductos en los planos horizontales mediante suelos radiantes y, sobre todo, dobles techos.

El éxito de la propuesta es absoluto, pues parece ser la respuesta idónea tanto a las demandas de un espacio eficaz como al conjunto de tecnologías que la industria ha puesto en marcha. Por eso son muchos los arquitectos que desarrollan este tipo para diferentes programas: naves industriales, edificios de oficinas suburbanos y diferentes espacios colectivos. Es, sobre todo, en SOM donde encontramos los avances más logrados: con ellos la solución se perfecciona y el vocabulario se extiende a nuevas variantes, siempre con planteamientos de gran rigor geométrico y constructivo. Entre las nuevas fórmulas destaca la solución de retrasar el acristalamiento respecto a la estructura, dando aún mayor protagonismo a la segunda y asumiendo el papel de pórtico de protección solar.

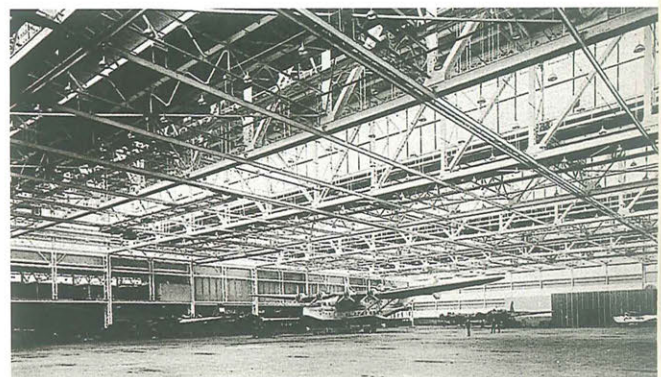
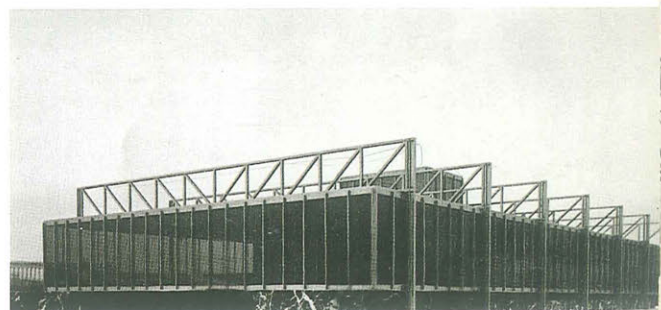
Pero lo más sorprendente del nuevo tipo es la brutalidad con que se enfrenta al aumento de la luz estructural sin cuestionar el principio porticado. Si Mies inventa en el Crown Hall la solución de sacar las jácenas al exterior cuando el espacio interno no puede asumir su canto, Albert Kahn resuelve en los hangares Glenn Mar-

Cummins Engine Company en Darlington (K. Roche y J. Dinkeloo, 1965). El armazón, los casquillos que peraltan las vigas, la

viga que contrarresta el empuje del viento en las fachadas, la perfilaría de éstas, los remates de cubierta, etc., se resuelven con perfiles comerciales

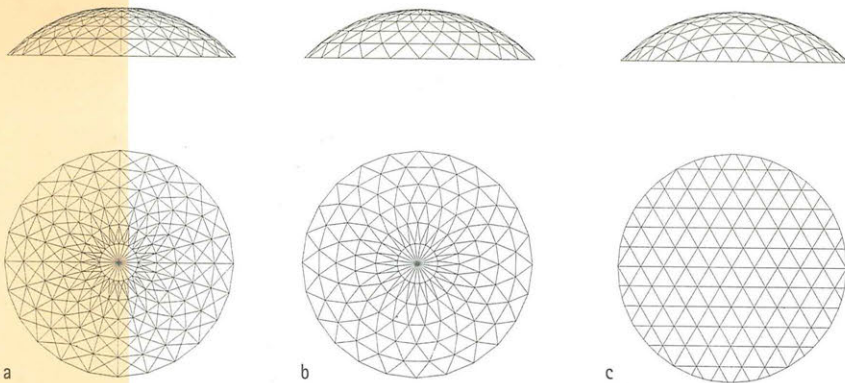
de acero soldados a tope, un sistema mínimo y rigurosamente organizado que tiene la fuerza de un orden clásico.

Teatro Nacional de Mannheim (L. Mies van der Rohe, 1952).

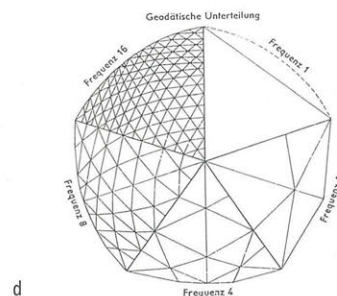
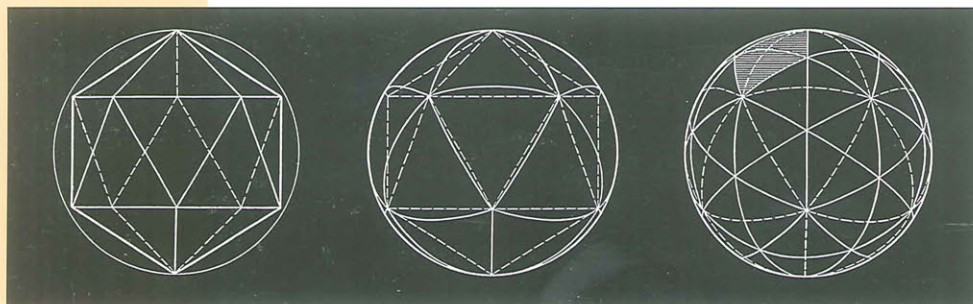


Interior del Assembly Building de los hangares Glenn Martín en Baltimore (A. Kahn, 1937). El

récord de luz -91x137 metros libres- se logra con un emparrillado plano.



a- Cúpula Schwedler.
b- Cúpula en Lamela.
c- Cúpula reticulada en tres direcciones.
d- Cúpula geodésica y esquema de generación a partir del icosaedro.



5. Mallas espaciales y cascarones.

Se triangula la cúpula, descomponiendo su superficie en una red isotropa: se rompe así la distinción pared-cubierta, fundamental en el sistema adintelado, y se recupera la colaboración integral entre estructura y cerramiento.

tin 130 metros de luz con un sistema de vigas trianguladas de canto constante. Después, el propio Mies y muchos otros repetirán la solución, indiferentes a su escala, manteniendo el cajón adintelado como solución al recinto diáfano.

Mallas espaciales y cascarones

Las opciones que el XIX ofrece a la construcción de cúpulas tienen una gran continuidad en nuestro siglo, con interesantes descubrimientos: a partir de las propuestas de Schwedler la solución general para la cúpula es su triangulación, descomponiendo su superficie en una red lo más isotropa posible. Es así como de las cúpulas de costillas llegamos a los cascarones continuos.

Tras la Segunda Guerra su desarrollo es espectacular, y se proponen diferentes soluciones geométricas y constructivas a la malla: la cúpula de Lederer en Brno (1959) o la del Descubrimiento en Londres (1951) son los ejemplares más conocidos de una solución que llega a ser un producto de serie con las patentes de R.B. Fuller.

El planteamiento de Fuller tiene un gran alcance: es un constructor de artefactos, no necesariamente arquitectónicos, y no hay para él otro principio que la respuesta óptima desde estrictas consideraciones físicas, lo que le permite concluir que la triangulación y la forma esférica, como principios de máxima eficiencia, deben ser las bases del espacio contemporáneo.

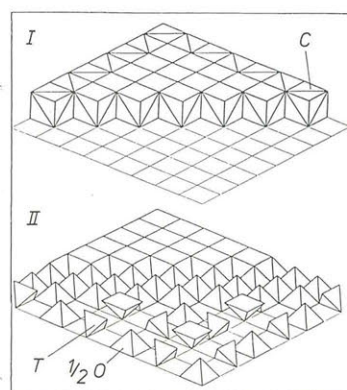
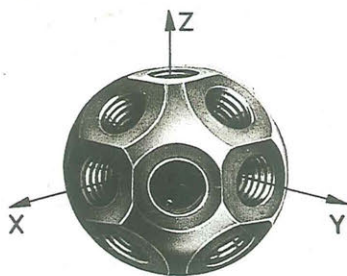
Tiene, además, el genio de integrar ambos en la cúpula geodésica: una esfera triangulada en forma homogénea que es el resultado de proyectar el icosaedro sobre su superficie, de modo que resulta una geometría repetitiva de barras y nudos que permite su fabricación en serie. Se trata de una estructura mínima, con la, también, mínima superficie de intercambio y un montaje elemental de piezas-tipo simplemente articuladas.

La triangulación de la cúpula es, por su carácter no desarrollable, un caso complejo entre las diferentes superficies; el principio se aplica a todas ellas, y muy especialmente a la bóveda cilíndrica. Los cascarones metálicos son la herramienta que permite volver a conectar con las formas del XIX.

Pero gracias a la aparición de las mallas espaciales —que es el acontecimiento más significativo después de las experiencias comentadas—, las estructuras trianguladas no se van a limitar a las formas esféricas o en cañón.

La idea ya estaba claramente planteada en los modelos de Graham Bell de 1907: una red prefabricada de barras organizadas en prismas piramidales o tetraédricos es estable por su geometría, sin requerir nudos rígidos, y puede equilibrar cualquier sistema de cargas trabajando sin flexiones, siempre y cuando las cargas actúen en los nudos. El aspecto fundamental es que la forma no importa

Sistema Mero (M. Mengerhausen, 1940). El poliedro de 26 caras permite realizar redes cúbicas, piramidales y tetraédricas.





para la estabilidad; la malla espacial no es, por tanto, un tipo estructural, sino un aparejo capaz de generar diferentes formas.

Pero el sistema no iba a estar disponible mientras no se resolvieran su ejecución y su cálculo, obviamente complejos y costosos. Tras las primeras soluciones con nudos soldados se suceden un conjunto de propuestas y patentes (la denominada Mero es de 1942) que culminan en diferentes mecanos de piezas tipo ya asequibles, que se empiezan a aplicar inmediatamente al problema de las medias y grandes luces.

Esta técnica abre unas posibilidades completamente nuevas: durante años, la estructura metálica se había asociado con los sistemas adintelados, tanto por la sencillez de éstos como por la dificultad de construir superficies más complejas y continuas, con uniones y piezas de difícil ejecución, dejando al hormigón armado para las geometrías más complicadas. Las mallas espaciales cambian esta óptica y parecen el instrumento adecuado para construir superficies continuas que, con la forma adecuada, pueden asimilarse a membranas y dar lugar a estructuras de peso mínimo.

En primer lugar, la malla espacial permite superar las limitaciones de luz de los cascarones, realizándolos de doble capa. De nuevo, la bóveda cilíndrica y la esfera son las soluciones más repetidas: el Pabellón de la Expo de Montreal es, quizás, la más

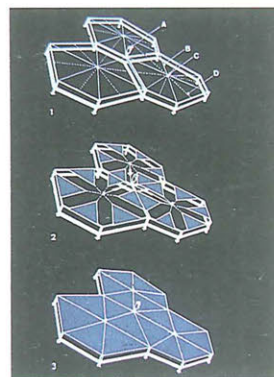
conocida entre las miles de cúpulas construidas.

Pero la malla hace posible, como hemos visto, una nueva libertad de forma, que se aplicará ahora a búsquedas más libres y expresionistas: por ejemplo, los proyectos de K. Wachsmann parecen traducir al acero las intuiciones futuristas; la idea permitirá desde entonces planear el gran recinto como un espacio informal.

Como había ocurrido hacía un siglo, son los ingenieros los padres de los nuevos tipos, y, de nuevo, su espíritu no es ajeno a los conceptos de estructura mínima y forma energéticamente óptima que los científicos están descubriendo en la Naturaleza. Pero es en las construcciones de Fuller donde mejor reconocemos un planteamiento que es absolutamente nuevo.

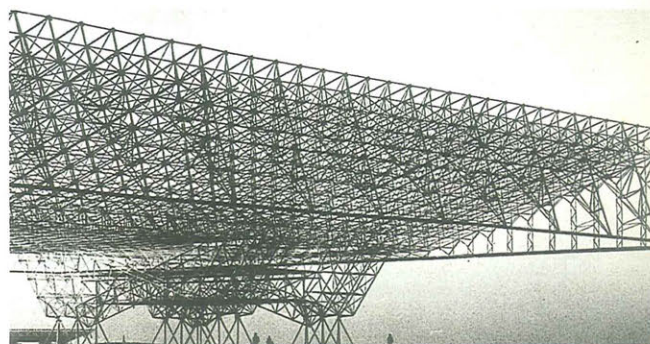
Por un lado, se ha roto la distinción pared-cubierta, que era básica en el sistema adintelado, y se recupera la colaboración estructura-cerramiento como un todo. Algunas cúpulas geodésicas llegan a construirse incluso por escamas completas, en vez de organizarse como un bastidor tubular con el cerramiento superpuesto.

El vidrio vuelve a ser el aliado de la superficie y se persigue de nuevo aquel espacio óptimo representado en el invernadero: en el Pabellón de Montreal, el cerramiento transparente se completa con un parasol textil motorizado conectado a unas células fotoeléctricas que le permiten efectuar una respuesta variable a lo largo

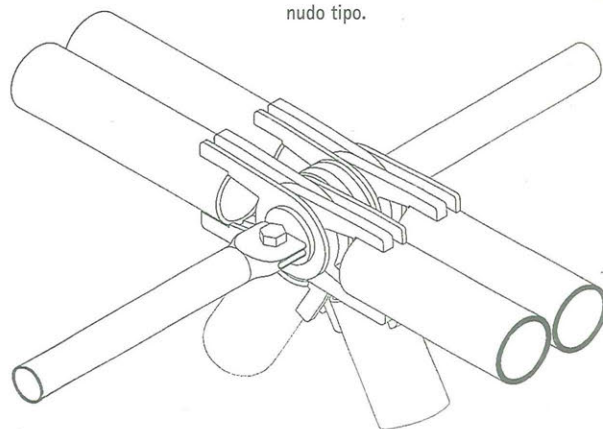


Pabellón norteamericano en la Expo de Montreal (R. B. Fuller, 1967): 70 metros de diámetro y red geodésica de frecuencia 7 (nº de veces que se divide cada cara del icosaedro inicial). La red de pirámides de base hexagonal se cierra con paneles acrílicos, de transparencia decreciente hacia el cenit. El parasol es un sistema de cortinas enrollables

triangulares, accionadas por una célula fotoeléctrica central a cada hexágono.

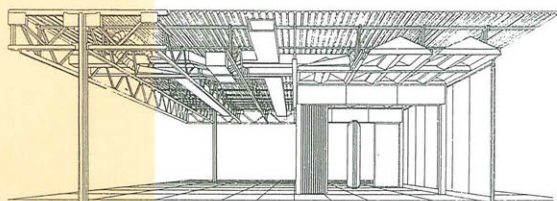


Proyecto de hangar para Atlas Aircraft (K. Wachsmann, 1945): maqueta y nudo tipo.



6. Polideportivos y soluciones industrializadas.

Las patentes de paneles, pórticos prefabricados o cubiertas proliferan en los setenta para resolver la gran demanda de espacios colectivos de escala intermedia.



La ingente obra de G. Behnisch es todo un muestrario de variaciones manieristas del sistema porticado en la construcción de espacios deportivos, tomando como referencia constante la relación entre estructura e iluminación.



SCSD en California (E. Ehrenkrantz, 1961). Su gran novedad es la integración de sistemas para lograr un 'forjado equipado': mecano estructural –con su forjado de acero incorporado–, climatizador con 'pulpos' flexibles y móviles, techo con reflectores y difusores variables, guías de tabiques móviles, etc.

de la superficie; además, el cerramiento transparente se tinte en verde con diferente intensidad en relación a la incidencia solar.

Polideportivos y soluciones industrializadas

Los años setenta se caracterizan por la gran demanda de espacios colectivos de escala intermedia, escuelas y, sobre todo, polideportivos, que se pretende sean edificios sencillos y económicos.

La ya larga tradición de construcciones industriales permite resolverlos por asimilación a una sencilla nave de pórticos paralelos y cerramientos ligeros, ya que comparten con ellas el orden de luces. Son los años de la 'industrialización por componentes', en los que proliferan las patentes de paneles, pórticos prefabricados, cubiertas, etc. Las más extendidas son las construcciones de cubierta plana a base de vigas trianguladas o mallas espaciales: la fórmula tiene un absoluto éxito comercial, y el cajón de vigas trianguladas llega a hacerse solución indiscutida para los programas deportivos, al tiempo que va configurándose como un producto industrial.

Aunque esto se ha llegado a identificar, y especialmente en España, con unas construcciones de muy bajas prestaciones de todo orden, no siempre fue así. Encontramos también actitudes más experimentales y algunos proyectos tan ambiciosos como el SCSD, un sistema de escuelas en California y en el que el plano estructu-

ral horizontal se transforma en un producto de serie para un espacio de altísimas prestaciones.

Otras interesantes muestras las encontramos en la arquitectura francesa y, dentro de ella, en el programa "1000 Piscinas". Aquí tienen cabida piscinas industrializadas con cubierta retráctil (las piscinas Tournesol o Caneton), construcciones trianguladas cupulares, y las primeras propuestas de un espacio informal cubierto por una malla espacial íntegramente acristalada (Palacio de Nantes).

A medida que se va abandonando el objetivo industrial, las propuestas de estos espacios de escala intermedia resultan progresivamente más desvaídas y manieristas, como efecto de operaciones tales como la descomposición del cajón de vigas trianguladas en formas menos rotundas, la incorporación de nuevas y más sofisticadas patentes y materiales, o la cruda aceptación de la condición elemental del cajón.

Experimentos con los nuevos palacios

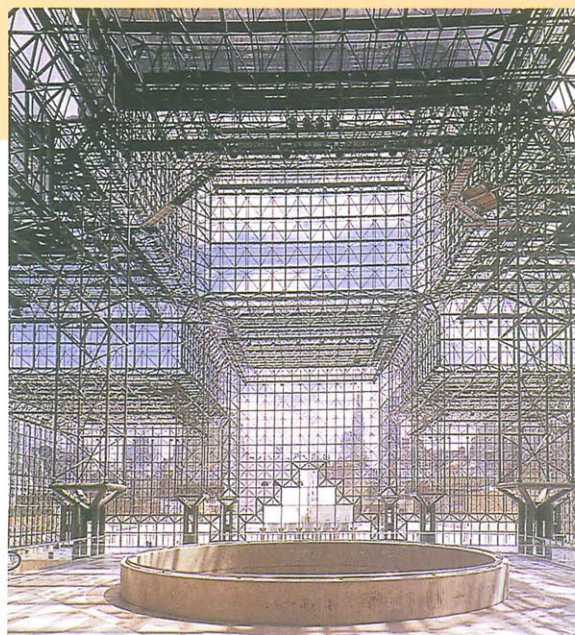
Con los cascarones y las mallas espaciales se vuelve a investigar el edificio como un todo, y de las construcciones cupulares se pasa pronto a considerar otras posibilidades espaciales. Además, de nuevo se produce la asociación con una revolucionada tecnología del vidrio que vuelve a poner sobre la mesa el palacio de cristal.

Primero, el cajón adintelado puede cambiar drásticamente su escala: del

7 Experimentos con los nuevos palacios.

El desarrollo tecnológico del vidrio y las experiencias con la triangulación posibilitan grandes poliedros transparentes en los que el impacto espacial es prioritario.

Palacio de Convenciones en Nueva York (I.M. Pei).
La eficacia estructural y energética de la forma es secundaria: la confianza en una industria todopoderosa es la llave de estos edificios.



Palacio de Cristal de Madrid al Omnisport de Bercy, o a la gran plaza que Tange construye en la Expo de Osaka (en franca oposición a una Expo que fue la presentación de las nuevas estructuras tensadas), se retoma la solución de Mies Van der Rohe, ahora justificada con la disponibilidad de la malla para integrar los crecientes sistemas de instalaciones, cuya presencia espacial se favorece. Todavía hoy el plano infinito de canto abrumador sigue tentando a los arquitectos.

Las posibilidades de la triangulación para hacer factible configuraciones insólitas, imposibles con estructuras menos redundantes, sugieren también un nuevo espacio informal, formas cristalógráficas libres de los enojosos planteamientos circulares o lineales. Parece que es en América donde por primera vez aparecen estos grandes poliedros transparentes que culminan en dos construcciones tan impresionantes como la catedral de Garden Grove (Johnson) y el Palacio de Convenciones de Nueva York (Pei). El 'impacto espacial' ahora posible se impone a cualquier consideración de eficiencia mecánica o climática, y el recinto diáfano adopta la misma indiferencia hacia los problemas energéticos que había marcado la historia de los rascacielos, ahora posibilitada por la nueva tecnología del vidrio (son la bajísima transparencia del acristalamiento y los sellados estructurales los que hacen posible la habitabilidad de estos recintos).

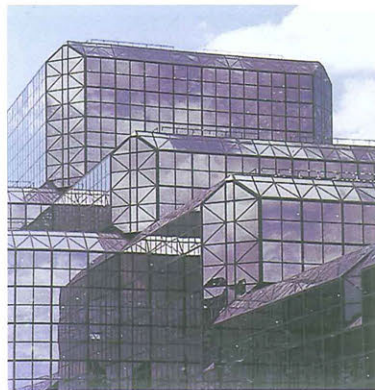
La geometría se sigue liberando con la fabricación robotizada de las mallas, que no requieren ya organizarse en un conjunto básico de piezas tipo.

El Palau Sant Jordi es una declaración de estas nuevas posibilidades, aquí menos interesada por las formas esculturales y más próxima a la tradición del gran recinto de los años setenta: el propio sistema de montaje (el Pantadome de Kawaguchi) trata de revitalizar la actualidad de las estructuras trianguladas, ya puestas en cuestión, como veremos, en los diseños de grandes luces, y la forma, aunque constructivamente poco rigurosa, mantiene una estricta confirmación funcional.

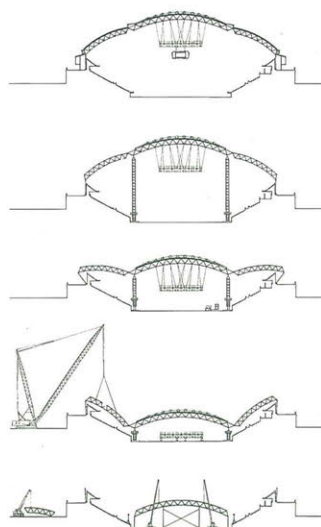
Hoy y mañana

No existe una tradición específica de recinto único en acero, sino un conjunto de experiencias apasionantes de las que podemos aprender muchas cosas.

Ante todo debemos huir de la oposición que se establece frecuentemente entre sistemas adintelados y superficies óptimas: los primeros, como depositarios de las ambiciones clásicas de orden y serenidad; las segundas, como experimentos de ingenieros alejados de nuestras preocupaciones. Es verdad que la tradición de Mies fue tremendamente fructífera en los primeros años Mies-SOM, iniciando un sistema ordenado envidiable y de gran actualidad, pero la arquitectura adintelada cumplió su ciclo y consolidó sus aspiraciones, y



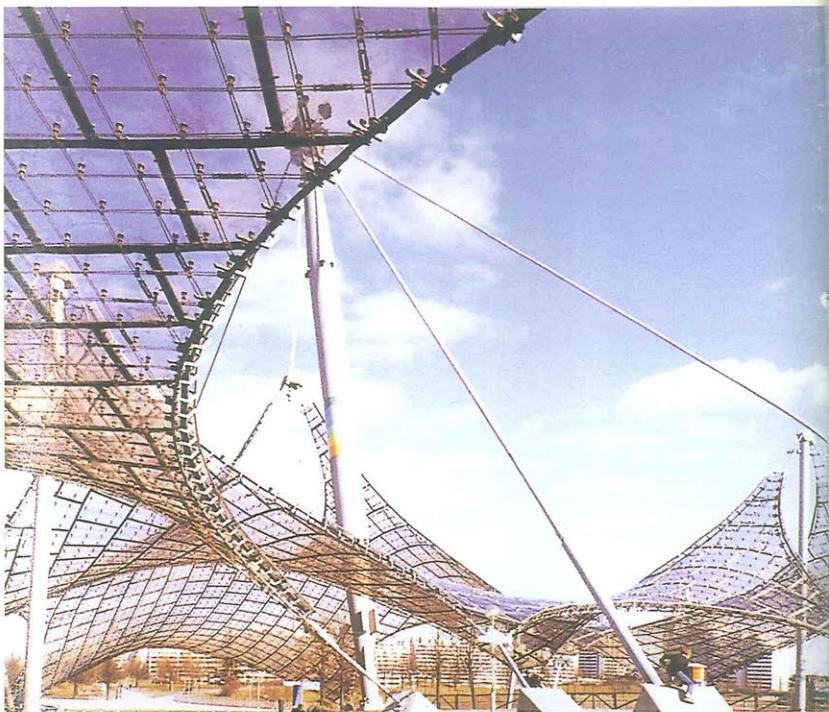
La malla espacial está fabricada con un increíble grado de precisión; el vidrio tiene un alto nivel de protección (transparencia luminosa del orden del 10 %), y los sellados estructurales son de silicona, de cuya estanqueidad, adherencia y flexibilidad depende todo el edificio.



Palau Sant Jordi en Barcelona (A. Isozaki y M. Kawaguchi, 1985-1990). La ingeniería japonesa desarrolla en esta obra un nuevo concepto de montaje con dos elementos: el sistema de elevación y el nudo ajustable. Este último permite desviaciones geométricas de las piezas o del montaje que se corrigen al regular la unión roscada (Patente ORTZ).

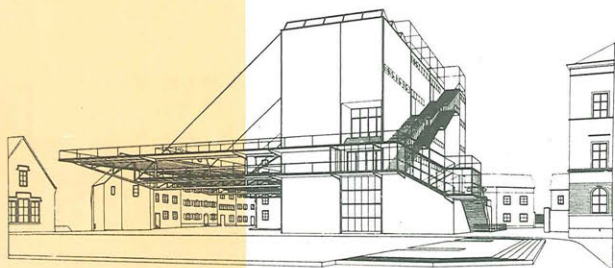
8. Hoy y mañana.

El auge que actualmente presentan los cascarones metálicos y los sistemas tensados puede propiciar formas enteramente nuevas, que deberían nacer con la 'ingenuidad' con la que, ya a finales el XVIII, lo hizo el invernadero.



El puente de Brooklyn (J.A. y W.A. Roebling, 1877-1883).

Escuela en Basilea (H. Meyer y H. Wittwer, 1926). El Movimiento Moderno hace suyo los planteamientos visionarios de las arquitecturas en suspensión, un campo que abrieron los ingenieros con el trazado de grandes puentes colgantes.



el futuro requiere integrar nuevas experiencias.

En este sentido, numerosas realizaciones de la arquitectura *high-tech* son indudablemente interesantes. Por encima de muchas de sus desproporciones, esta arquitectura ha recuperado el concepto de cascarón, de superficie óptima, y con él, el mito del palacio de cristal.

Obsecarse en no ver los progresos de los sistemas estructurales y su potencialidad para ofrecer respuestas nuevas es volver al papel del pelma arquitecto historicista, que fue tan estéril como el escultor de Apolos.

Las respuestas no son obvias. Hemos visto a los ingenieros poniéndonos sobre las manos nuevos instrumentos y nuevos conceptos. La arquitectura moderna no se separará nunca más de la solución óptima, como óptimos fueron el teatro griego o la catedral gótica: las respuestas más eficientes con los medios de su tiempo. Y fueron precisamente ellas las portadoras de un nuevo orden, las que actualizaron la búsqueda de una plástica armónica y totalizadora.

Inevitablemente estamos ligados a los tipos adintelados; lo estamos por nuestra formación en los sistemas de pórticos y la geometría diédrica, por las pocas expectativas actuales de una actitud investigadora, por nuestra poca formación en las ciencias físicas. Pero el tiempo no nos espera y, de hecho, hace ya tiempo que el 'inge-

nio humano va por delante de nuestra experiencia.

Desde que en 1883 Roebling terminó el Puente de Brooklyn, los arquitectos sabían que tenían por delante un nuevo campo inexplorado, y no es casualidad que Wright, Le Corbusier o Aalto desarrollaran propuestas visionarias de estructuras en suspensión. Los cables de acero de alta resistencia estaban disponibles desde tiempo atrás, y un edificio como la Arena de Raleigh, construida en 1952 por Nowicki, muestra que en el recinto diáfano es posible una revolución similar a la que vivieron los puentes.

Poco después, F. Otto inició el estudio y la divulgación de las redes de cables: en 1958 Viera construye el Estadio de Montevideo; de 1966 es el Coliseo de Oakland de SOM, etc. Las estructuras tensadas inauguraron un nuevo campo de conocimiento, alterando aún más nuestra maltrecha formación: la estabilización de estos sistemas da como resultado complejas formas alabeadas que originan reacciones de tracción en su perímetro y requieren elementos capaces de contrarrestarlas; los cerramientos, más que colaborar con la red, tienen que resolver el problema de acompañar el alabeo y ser compatibles con la gran deformabilidad de la estructura; el sistema estructural altera tan a fondo los principios de organización experimentados hasta el momento que los nuevos tipos nacen con una

Estadio Olímpico de Munich (F. Otto y G. Behnisch, 1972). Las tensiones que se generan en esta red de cables se equilibran transmitiendo de modo explícito las compresiones de los mástiles y las tracciones de los tirantes sobre la cimentación.

renovada libertad. Un poco más adelante, con las fábricas textiles, los cambios serán aún más profundos.

Pero todo esto escapa al alcance del presente comentario: las membranas y los sistemas tensados deben ser analizados fuera de los límites de la construcción metálica.

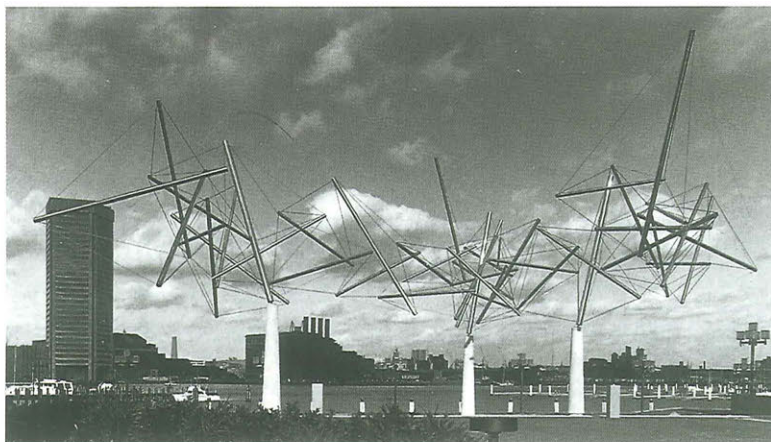
El gran desarrollo que la construcción en acero ha tenido durante la segunda mitad del siglo ha cristalizado en un conjunto de nuevas tipologías estructurales cuyo alcance supera con mucho las primeras soluciones porticadas; ante las nuevas posibilidades de formas de comportamiento mecánico y energético óptimo, aquellos recintos adintelados aparecen como el resultado de un imperativo compositivo sin mucha razón de ser.

Los cascarones metálicos y los sistemas tensados están teniendo un auge sin precedentes, y junto a las nuevas técnicas de cerramiento (sobre todo el desarrollo del vidrio) y acondicionamiento, contienen la posibilidad de formas enteramente nuevas, que deben nacer con la 'ingenuidad' con la que lo hizo el invernadero.

Para que esta arquitectura se abra paso, los arquitectos tienen que quitarse mucho lastre de encima, reconocer la naturaleza física (racional) del problema planteado, intentar llevar a la sociedad respuestas nacidas de sus necesidades... porque la historia del XIX parece que vuelve a repetirse. [T]

"Easy landing", escultura en acero inoxidable de Snelson. Se basa en los principios

Tensegrity, de R. Buckminster Fuller: sistema de fuerzas que se equilibran a sí mismas; los elementos a compresión no se tocan, van enlazados por cables a tracción.



"Amagi Dome" (M. Saitoh, 1991). Estructura basada en el sistema Tensegrity.

BIBLIOGRAFÍA

- C. Wilkinson. *Supersheds*. Butterworth Architecture. Oxford, 1991.
- M.L. Crosnier y otros. *Eiffel*. Ed. Adam Biro. Paris, 1989.
- R. Jodice. *The iron dome in the nineteenth century*. IASS Bulletin 101.
- S. Minter y otros. *The greatest Glass House: Royal Botanic Gardens, Kew*. HMSO. London, 1990.
- G. Hildebrand. *The Architecture of Albert Kahn*. MIT Press. Cambridge, Mass, 1974.
- F. Dal Co. *Kevin Roche*. Rizzoli International. New York, 1986.
- O. W. Grube. *Industrial Building and Factories*. The Architectural Press. London, 1971.
- Makowski. *Estructuras espaciales de acero*. G. Gili. Barcelona, 1968.
- *Vision der Moderne*. Prestel-Verlag. 1986.
- R. Grimaldi. *R. Buckminster Fuller. 1895-1983*. Officina Edizioni. Roma, 1990.
- *Bauen + Wohnen* n° 10. Octubre, 1967.
- R. Bender. *Una visión de la construcción industrializada*. G. Gili. Barcelona, 1976.
- R. Banham. *La arquitectura del entorno bien climatizado*. Ediciones Infinito. Buenos Aires, 1975.
- *The Architectural Review* n° 1178. Abril, 1995.
- C. Wiseman. *J.M. Pei: A profile in American Architecture*. Harry N. Abrams, Inc publishers. New York, 1990.
- J. Martínez Calzón. *Palau Sant Jordi*. Revista de Obras Públicas n° 3313. 1992.



Secuencia de montaje de una de las estructuras tensadas

de D. Geiger, en la que no existen triangulaciones, sino

barras verticales, cables radiales y perimetrales. Del anillo exterior de compresión se cuelga un primer

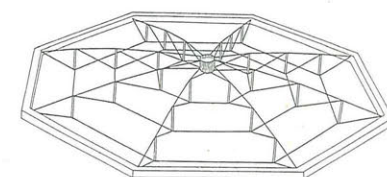
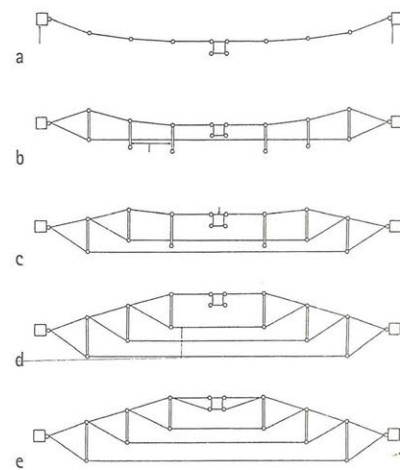
cable (a) -que quedará finalmente en la parte superior-, del que se suspenden las

barras que trabajarán a compresión (b); éstas se van uniendo

por su parte inferior de forma homóloga a un segundo cable en

forma de anillo, y se repite el

procedimiento para



hacer subir progresivamente la estructura (c-e).